

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ  
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ АВТОНОМНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ  
«НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ  
УНИВЕРСИТЕТ «МИСиС»

---

---

Институт ИТКН

Кафедра инженерной кибернетики

Направление подготовки: «01.03.04 Прикладная математика»

Квалификация: бакалавр

Группа: БПМ-18-1, БПМ-18-3

## ОТЧЕТ

### ПО КУРСОВОЙ РАБОТЕ

#### «ИМИТАЦИОННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ»

на тему: моделирование пешеходных потоков в аэропорту «Внуково»

Студенты

\_\_\_\_\_/Пахарева Кира Станиславовна/  
подпись (ф.и.о. полностью)

\_\_\_\_\_/Юркин Павел Олегович/  
подпись (ф.и.о. полностью)

Руководитель

Владимировна

\_\_\_\_\_/профессор к.т.н Крапухина Нина  
подпись должность, уч. степ. Фамилия И.О.

Оценка:

Дата защиты:

---

---

## Оглавление

Введение.....	3
Цель построения модели.....	4
Актуальность.....	5
Описание особенностей предметной области.....	7
Содержательная и математическая постановка задачи.....	9
Исходные данные.....	10
Входные, выходные переменные и состояния.....	11
Принятые гипотезы.....	15
Описание структуры модели и ее элементов.....	16
Результаты моделирования.....	24
Выводы.....	27
Распределение работы.....	30
Источники.....	31

## Введение

Курсовой проект направлен на моделирование движения пешеходов, которые прибывают и убывают в аэропорте "Внуково". В основу берем дискретно-событийные и агентные подходы. Для этого мы используем Пешеходную библиотеку среды имитационного моделирования AnyLogic.

Благодаря инструментам для моделирования пешеходных потоков и анализа поведения толпы среды AnyLogic, появилась возможность достаточно точно смоделировать, визуализировать и проанализировать то, как большие потоки людей ведут себя в физическом пространстве, и оптимизировать его конфигурацию.

В нашей имитационной модели агент передвигается согласно заданным правилам. Он взаимодействует с окружающими объектами, такими как стены и эскалаторы, и избегает возможных столкновений с препятствиями и другими пешеходами. Заказчик модели сможет задать агентам индивидуальные параметры, предпочтения и состояния.

При разработке курсового проекта выполнен анализ основных действий агентов в аэропорту «Внуково», а также предложен вариант, который позволяет улучшить показатели работы аэропорта. Разработанная имитационная модель может быть использована для проектирования новых элементов схемы пешеходного движения, а также для оптимизации существующего движения пассажиров аэропорта.

### Цель построения модели

Проанализировать пешеходные потоки на территории аэропорта с целью поиска мест большой загруженности пассажирами, так как существующая инфраструктура по мере увеличения пассажиропотока может быть не в состоянии обеспечить качественное обслуживание пассажиров и соответствующую логистику в пиковые режимы, и как следствие большие затраты на реорганизацию и реконструкцию самого аэропорта и прилегающих к нему территорий.

## Актуальность

При изучении аэропортов возникает много вопросов, касаемых работы всех систем при изменении нагрузки, при изменении режима работы некоторых систем, при введении новых систем, а также при увеличении пассажиропотока.

Аэропорт «Внуково» - один из четырех основных аэропортов Москвы и Московской области. Основной пассажирский комплекс «Внуково-1» состоит из трех терминалов. Общий пассажиропоток аэропорта в 2018 году 21,5 млн.<sup>1</sup> пассажиров. Маршрутная сеть аэропорта Внуково охватывает всю территорию России, а также страны ближнего зарубежья, Европы, Америки, Азии и Африки. Ежегодно в аэропорту обслуживается свыше 200 тысяч рейсов российских и зарубежных авиакомпаний.

По данным о пассажиропотоках аэропортов России число пассажиров растет с каждым годом (рисунок 1).



Рисунок 1. Пассажиропоток в аэропорту «Внуково».

Увеличение количества пассажиров при отсутствии развития инфраструктуры аэропорта приводит к образованию очередей, увеличению времени обслуживания, ухудшению качества обслуживания и в целом работы аэропорта.

<sup>1</sup> <https://tass.ru/ekonomika/6000243> [Электронный ресурс]

Для обеспечения максимальной комфортности пассажиров проанализировать движение пассажиропотока и работу пассажирского терминала аэропорта. Очевидно, что реальное тестирование схем движения пассажиров невозможно. Поэтому для анализа пешеходных потоков рационально использовать имитационное моделирование.

## Описание особенностей предметной области

Предметная область представляет из себя второй этаж аэровокзала Внуково-1. На территории второго этажа находятся стойки регистрации, паспортный контроль, выходы на посадку, бизнес-зал, камеры хранения, магазины, кафе, бары и многое другое. Пассажиры могут зайти с улицы с помощью двух входов с разной интенсивностью. На этаже находятся 10 туалетных зон, в частности и для людей с ограниченными возможностями. Также при входе находится зона предполетного досмотра и также существует разделение на международные и внутрироссийские перелеты.

В качестве инструмента для моделирования использована Пешеходная библиотека среды имитационного моделирования AnyLogic 8.7.4 Personal Learning Edition.

Пешеходы в AnyLogic передвигаются в соответствии с моделью социальных сил. Они выбирают кратчайшие пути, анализируя окружающее пространство, избегают столкновений с другими объектами и принимают решения по дальнейшим передвижениям. В дополнение к базовым блокам для моделирования перемещений в физической среде библиотека содержит элементы разметки пространства для задания стен, сервисов, лестниц и т.д.

Пассажиры в модели могут иметь индивидуальные свойства, предпочтения и состояния. Например, можно определять, есть ли у пассажира ручная кладь, каким рейсом он летит – внутренним или международным, является ли он VIP-клиентом.

Учитываемая статистика модели позволяет определить вместительность и пропускную способность объекта моделирования, подсчитывает количество пешеходов в разных зонах, измеряет время ожидания в очереди и время обслуживания одного клиента. Плотность пешеходного потока может быть отображена на карте плотности в соответствии с задаваемыми параметрами.

Среда AnyLogic поддерживает импорт 3D-объектов в виде X3D и VRML файлов. Пешеходные модели можно анимировать с помощью 3D-фигур людей или окружающих объектов, например, самолётов, турникетов и металлодетекторов. Возможности AnyLogic позволяют пользователям добавлять в пешеходную модель чертежи САПР, шейп-файлы и базы данных.

# СХЕМА ПАССАЖИРСКОГО ТЕРМИНАЛА А

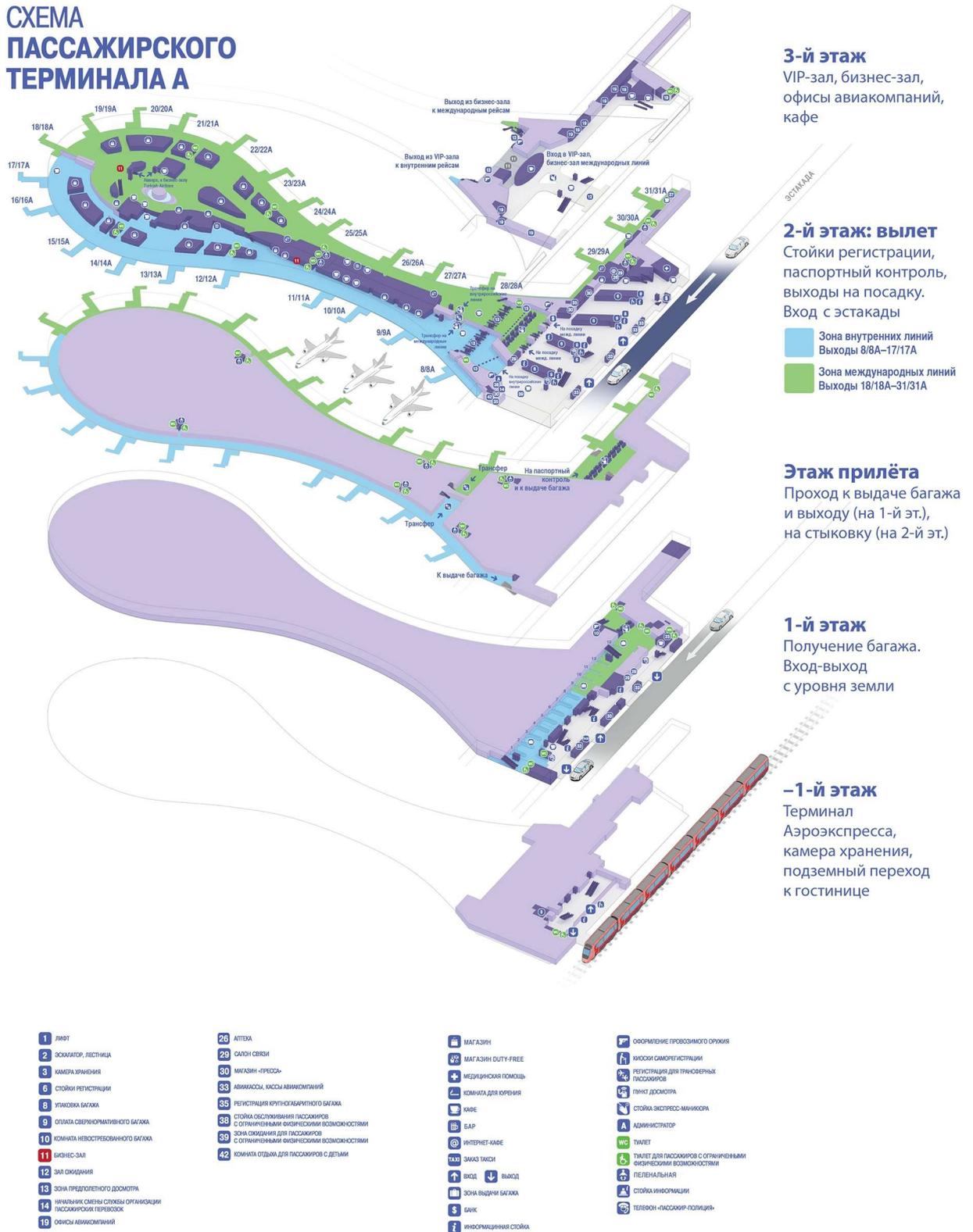


Рисунок 2. Схема пассажирского терминала А аэропорта «Внуково».

## Содержательная и математическая постановка задачи

Построить имитационную модель этажа вылета аэропорта и проанализировать пассажиропоток в здании аэровокзала с целью дальнейшей реорганизации в следствие повышения пассажиропотока.

Терминал А международного аэропорта Внуково предназначен для вылета пассажиров на внутренних и международных рейсах. Поток пассажиров с интенсивностью  $I$  попадают в аэропорт через центральный вход с вероятностью  $p_1$  и с подземной парковки по четырём эскалаторам с вероятностями

$p_2$  (сумма вероятностей  $p_1 + 4p_2 = 1$ ). При входе располагаются стойки регистрации пассажиров, где пассажиры проходят регистрацию в течение времени от  $t_{1min}$  до  $t_{1max}$  минут.

Терминал состоит из двух отдельных зон – зоны вылета на внутренних рейсах и зоны вылета на международных рейсах. В каждой из зон располагаются места досмотра пассажиров, магазины, туалет, зона ожидания вылета и выходы к самолётам.

После регистрации пассажиры попадают в зону досмотра, где производится досмотр в течение времени от  $t_{2min}$  до  $t_{2max}$  минут.

После прохождения досмотра пассажиры попадают в основную часть терминала, где с вероятностью  $p_3$  могут посетить магазин в течение времени  $t_{3min}$  до  $t_{3max}$  минут и с вероятностью  $p_4$  могут зайти в туалет и потратить на это от  $t_{4min}$  до  $t_{4max}$  минут. Время ожидания самолёта составляет промежуток времени от  $t_{5min}$  до  $t_{5max}$  минут.

## Исходные данные

В качестве исходных данных для построения модели используется информация о количестве пассажиров, популярности мест отдыха пассажиров, очередях стойках на регистрации, в залах ожидания, зонах беспошлинной торговли.

По статическим данным до пандемии пассажиропоток составлял 1500000 человек/месяц, в 2020 году он уменьшился на 500000.<sup>2</sup>

---

<sup>2</sup> <https://favt.gov.ru/> [Электронный ресурс]

## Входные, выходные переменные и состояния

Входные переменные модели приведены в таблице 1.

Наименование	Каким блоком задаются	Каким параметром блока задаются	Значение
Интенсивность потока пассажиров	pedSource	Интенсивность	1000 человек в час
Вероятности входа пассажиров с центрального входа или одного из эскалаторов	selectOutput5	Вероятность1 Вероятность2 Вероятность3 Вероятность4 Вероятность5	0.6 0.1 0.1 0.1 0.1
Вероятность регистрации у определённой стойки регистрации	selectOutput6	Вероятность1 Вероятность2 Вероятность3 Вероятность4	0.25 0.25 0.25 0.25
Длительность регистрации	pedService pedService1 pedService2 pedService3	Время задержки	2-5 минут
Вероятность вылета внутренним или международным рейсом	selectOutput	Вероятность	0.3
Время прохождения досмотра	pedService4 pedService5	Время задержки	0.5-2 минуты

Наименование	Каким блоком задаются	Каким параметром блока задаются	Значение
Вероятность посещения туалета	toWC toWC1 (блока типа selectOutput)	Вероятность	0.65
Время на посещение туалета	WC WC1 (блоки типа service)	Время задержки	2-5 минут
Вероятность посещения магазина	toShop toShop1 (блока типа selectOutput)	Вероятность	0.45
Время на посещение магазина	Shop Shop (блоки типа service)	Время задержки	2-10 минут

Таблица 1. Входные переменные модели.

Выходные переменные модели приведены в таблице 2.

Наименование	Чем определяются	Где выводятся
Среднее время пребывания в терминале для внутренних рейсов	переменная distribution блока timeMeasureEnd	Гистограмма chart
Среднее время пребывания в терминале для международных рейсов	переменная distribution блока timeMeasureEnd1	Гистограмма chart

Наименование	Чем определяются	Где выводятся
Количество улетевших пассажиров на внутренних рейсах	функция countPeds() блока pedSink	Временной график plot
Количество улетевших пассажиров на международных рейсах	функция countPeds() блока pedSink1	Временной график plot
Плотность пешеходного потока	блок densityMap	Карта плотности
Средняя длина очереди на регистрацию на каждой из стоек	функция size() блоков pedService-pedService3	Временной график plot1
Средняя длина очереди досмотр	функция size() блоков pedService4, pedService5	Временной график plot2

Таблица 2. Выходные переменные модели.

Законы распределения основных случайных величин приведены в таблице 3.

Наименование случайной величины	Закон распределения	Параметры закона распределения
Интенсивность прибытия пассажиров	Экспоненциальный	1000 человек в час
Вероятности входа пассажиров с центрального входа или одного из эскалаторов	Дискретный	0.6 0.1 0.1
Вероятность регистрации у определённой стойки регистрации	Дискретный	0.25
Время на регистрацию	Равномерный	2-5 минуты

Время на досмотр	Равномерный	0.5-2 минуты
Вероятность посещения туалета	Дискретный	0.65
Время на посещение туалета	Равномерный	2-5 минуты
Вероятность посещения магазина	Дискретный	0.45
Время на посещение магазина	Равномерный	2-10 минут

Таблица 3. Законы распределения основных случайных величин.

Основным выходным результатом имитационной модели является карта плотности пешеходов при перемещении в аэропорте «Внуково».

## Принятые гипотезы

Основные принятые гипотезы и допущения модели:

1. Интенсивность прибытия пассажиров в терминал является детерминированной величиной и не зависит от времени суток;
2. Время регистрации, время досмотра, время посещения туалета, время посещение магазина, время ожидания являются случайными величинами распределённым по равномерному закону;
3. Вероятность поступления пассажиров через центральный вход выше, чем из подземной парковки. Поступление пассажиров с каждого из выходов подземной парковки равновероятно;
4. Вероятность вылета пассажира на международном рейсе выше, чем на внутреннем;
5. Убытие пассажиров на посадку через каждый из выходов равновероятен.

### Описание структуры модели и ее элементов

Имитационная модель пешеходного движения в аэропорту «Внуково» разработана в среде AnyLogic 8.7.2 PLE с использованием пешеходной библиотеки. В модели реализованы дискретно-событийный (процессный) и агентный подходы к имитационному моделированию. Имитационная модель по своей сути представляет систему массового обслуживания (СМО) с применением агентного подхода.

Схема имитационной модели представлена на рисунке 3.

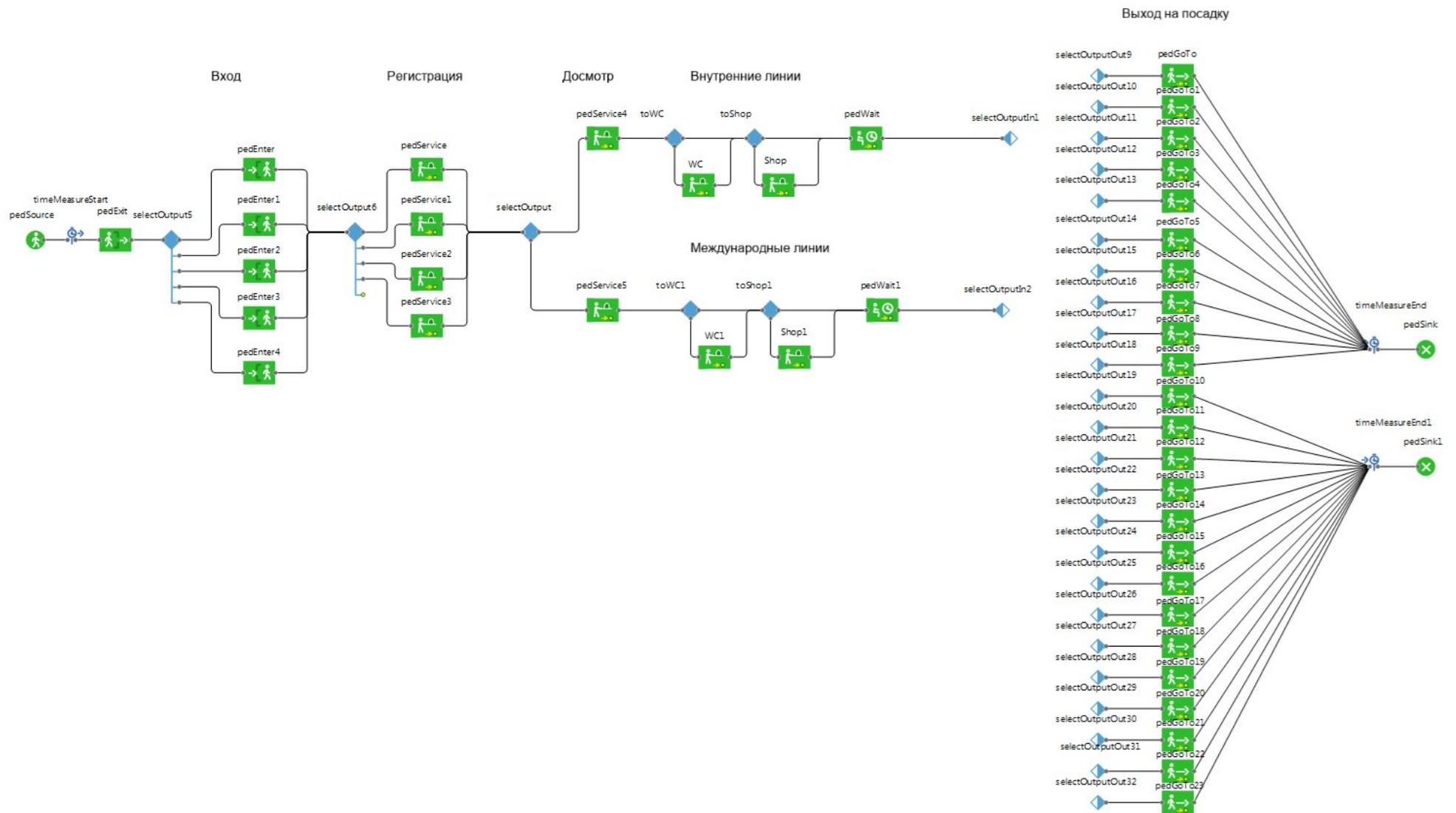


Рисунок 3. Схема имитационной модели.

Наименование	Тип	Описание
pedSource	pedSource	Создаёт поток пассажиров, прибывающих в аэропорта.
pedExit	pedExit	Агенты, моделирующие пассажиров, поступают из блока pedSource в блок pedExit где удаляются из пространства и поступают в блок selectOutput5.
selectOutput5	selectOutput5	Перенаправляет их с заданными вероятностями к одному из входов.
pedEnter pedEnter1 pedEnter2 pedEnter3	pedEnter	Возвращает агента на целевую линию входа в пространство.
selectOutput6	selectOutput5	Равновероятно перенаправляются на регистрацию.
pedService pedService1 pedService2 pedService3	pedService	Создает имитацию регистрации в аэропорту.
selectOutput	selectOutput	Разделяет поток пассажиров на внутренние и международные рейсы.
pedService4 pedService5	pedService	Моделируют досмотр пассажиров.
toWC toWC1	selectOutput	С заданной вероятностью перенаправляю агентов в блоки WC, WC1.

WC WC1	pedService	Моделируют посещение туалета.
toShop toShop1	selectOutput	С заданной вероятностью перенаправляю агентов в блоки Shop, Shop1.
Shop Shop1	pedService	Моделируют посещение магазина.
pedWait pedWait1	pedWait	Моделируют ожидание пассажирами вылета, длительность которого задаётся временем задержки данных блоков.
selectOutputIn1 selectOutputIn2	selectOutput	Разделяют пассажиров на выходы из зон международных и внутренних рейсов.
selectOutputOut9 selectOutputOut10 selectOutputOut11 selectOutputOut12 selectOutputOut13 selectOutputOut14 selectOutputOut15 selectOutputOut16 selectOutputOut17 selectOutputOut18	selectOutput	Перемещают агентов на целевые линии к блокам pedGoTo-pedGoTo9.
pedGoTo pedGoTo1 pedGoTo2 pedGoTo3	pedGoTo	Моделируют выход пассажиров на посадку на внутренние рейсы.

pedGoTo4 pedGoTo5 pedGoTo6 pedGoTo7 pedGoTo8 pedGoTo9		
selectOutputOut19 selectOutputOut20 selectOutputOut21 selectOutputOut22 selectOutputOut23	selectOutput	Перемещают агентов на целевые линии к блокам pedGoTo10-pedGoTo23.
pedGoTo10 pedGoTo11 pedGoTo12 pedGoTo13 pedGoTo14 pedGoTo15 pedGoTo16 pedGoTo17 pedGoTo18 pedGoTo19 pedGoTo20 pedGoTo21 pedGoTo22 pedGoTo23	pedGoTo	Моделируют выход пассажиров на посадку на международные рейсы.
pedSink	pedSink	Уничтожает агентов, моделирующих пассажиров улетевших внутренними рейсами.

pedSink1	pedSink	Уничтожает агентов, моделирующих пассажиров улетевших международными рейсами
----------	---------	--

Таблица 4. Описание элементов, моделирующих пешеходные потоки.

Движение пешеходов в пространстве организовано с помощью элементов разметки пространства пешеходной библиотеки AnyLogic (стена, прямоугольная стена, многоугольный узел, прямоугольный узел, целевая линия) и 3d-объектов из библиотеки 3D объекты (рисунок 4).

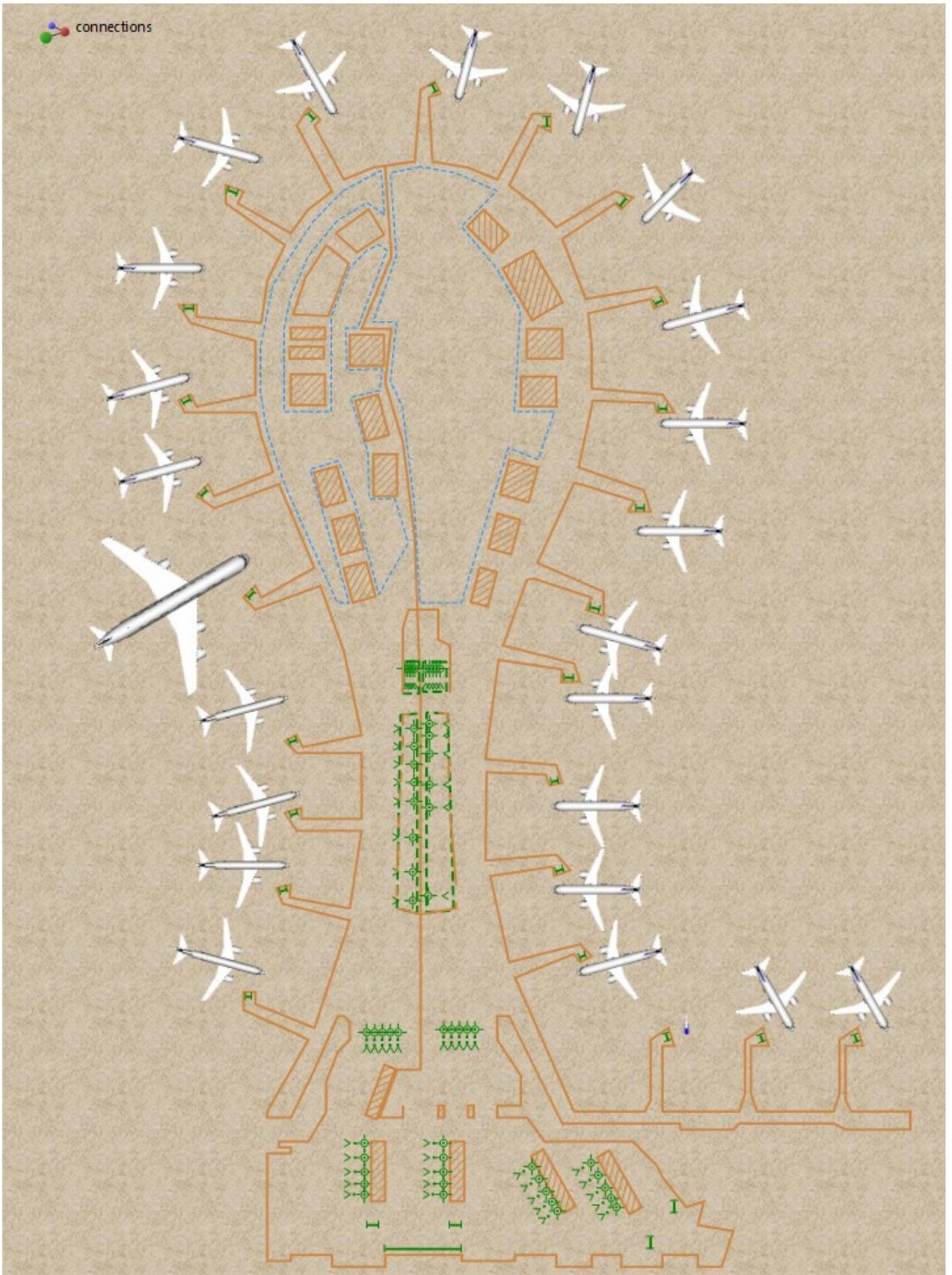


Рисунок 4. Пространство движения пешеходов.

Терминал разделён стеной на две зоны. В каждой зоне имеется место ожидания вылета, обозначенная в пространстве многоугольным узлом, туалет и

магазины. Каждому выходу соответствует целевая линия. Стойки регистрации и места досмотра пассажиров моделируются сервисами с очередями, а магазины и туалеты сервисами с областью.

Процесс моделирования отображается в 3d-окне (рисунок 5).



Рисунок 5. Отображение процесса моделирования в 3d-окне.

## Результаты моделирования

В результате моделирования одного часа работы терминала (60 единиц модельного времени), получены следующие результаты, представленные на рисунках 6, 7, 8, 9 и 10. На рисунке 6 продемонстрирован временной график, показывающий количество вылетевших пассажиров на международных и внутренних рейсах. На рисунке 7 приведена карта плотности движения пешеходов на территории терминала А. На рисунке 8 показан временной график средней длины очереди на регистрацию на каждой стойке (1, 2, 3, 4). На 9 рисунке изображен временной график средней длины очереди на досмотр на внутренних и международных рейсах. Временной график на рисунке 10 отображает время пребывания в терминалах международных и внутренних рейсов.

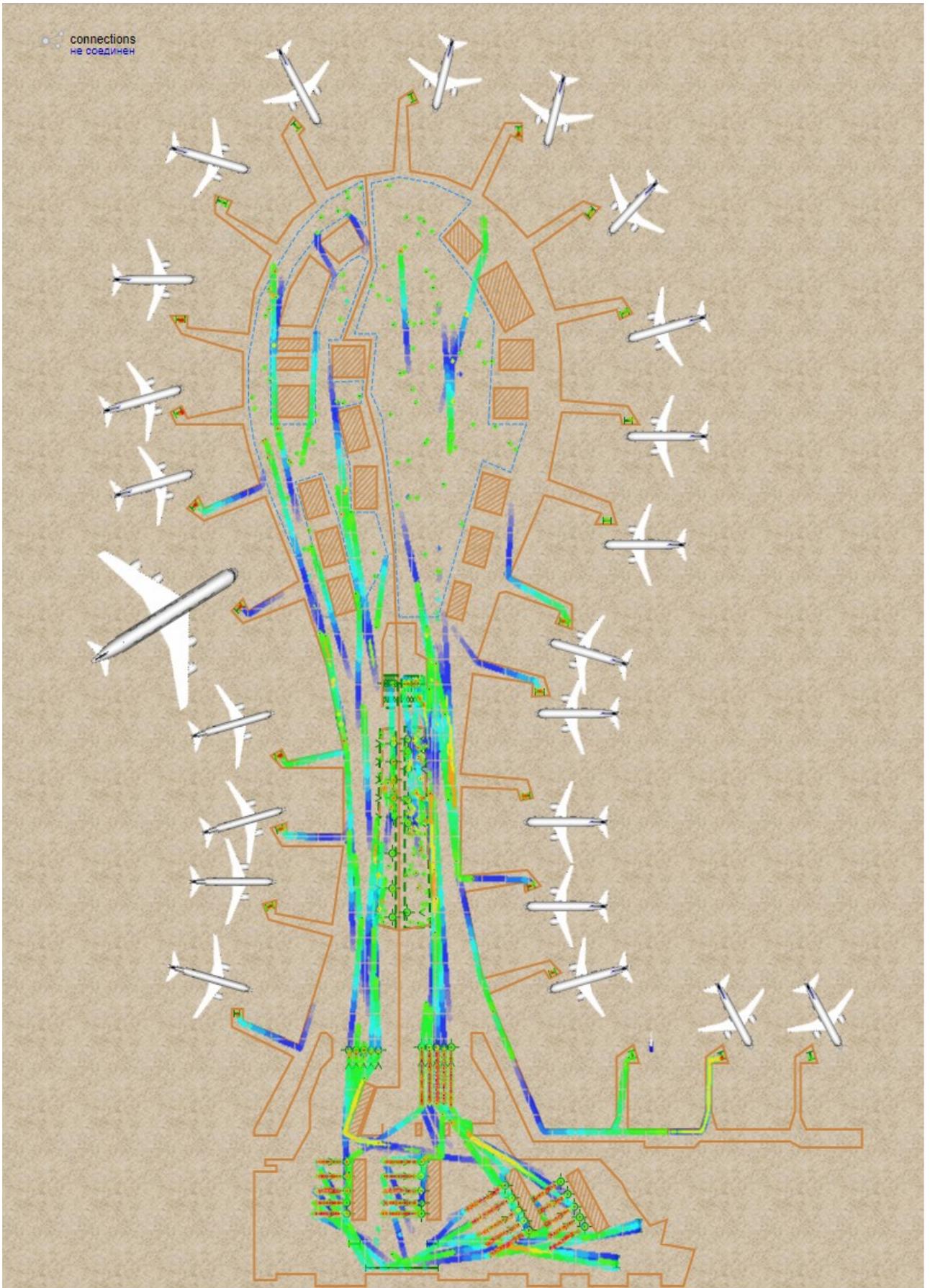


Рисунок 6. Карта плотности движения пешеходов.

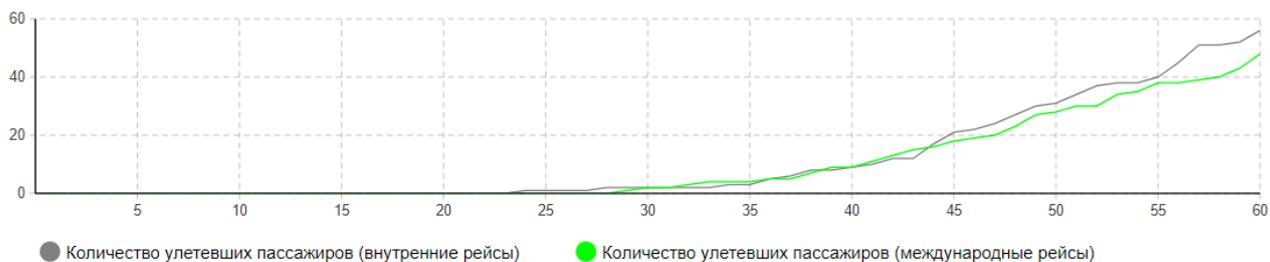


Рисунок 7. Количество вылетевших пассажиров.

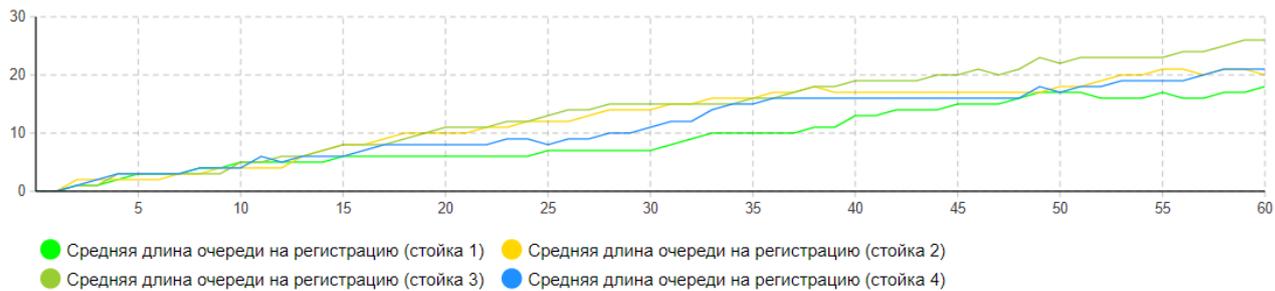


Рисунок 8. Динамика средней длины очереди на регистрацию.



Рисунок 9. Динамика средней длины очереди на досмотр.

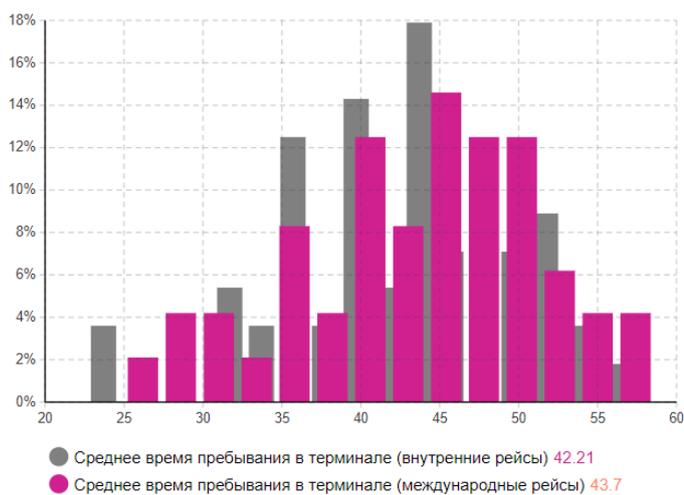


Рисунок 10. Время пребывания в терминале.

## Выводы

- 1) При данной интенсивности потока пассажиров, плотность пешеходного поток не критическая;
- 2) Длина очереди при регистрации пассажиров достигает 25 человек, что является неудовлетворительным. Требуются дополнительные стойки регистрации;
- 3) Длина очереди при досмотре в зону международного вылет достигает 35 человек, что является неудовлетворительным. Требуются дополнительные посты досмотра пассажиров, вылетающих на международных рейсах.

Эксперименты с моделью показали, что необходимо добавить до 8 количество сервисов регистрации, до 12 количество сервисов досмотра на международные рейсы и до 6 количество сервисов досмотра на внутренние рейсы. В данном случае очередь на досмотр не будет превышать 8 человек. Результаты имитационного моделирования в данном случае представлены на рисунках 11-15.

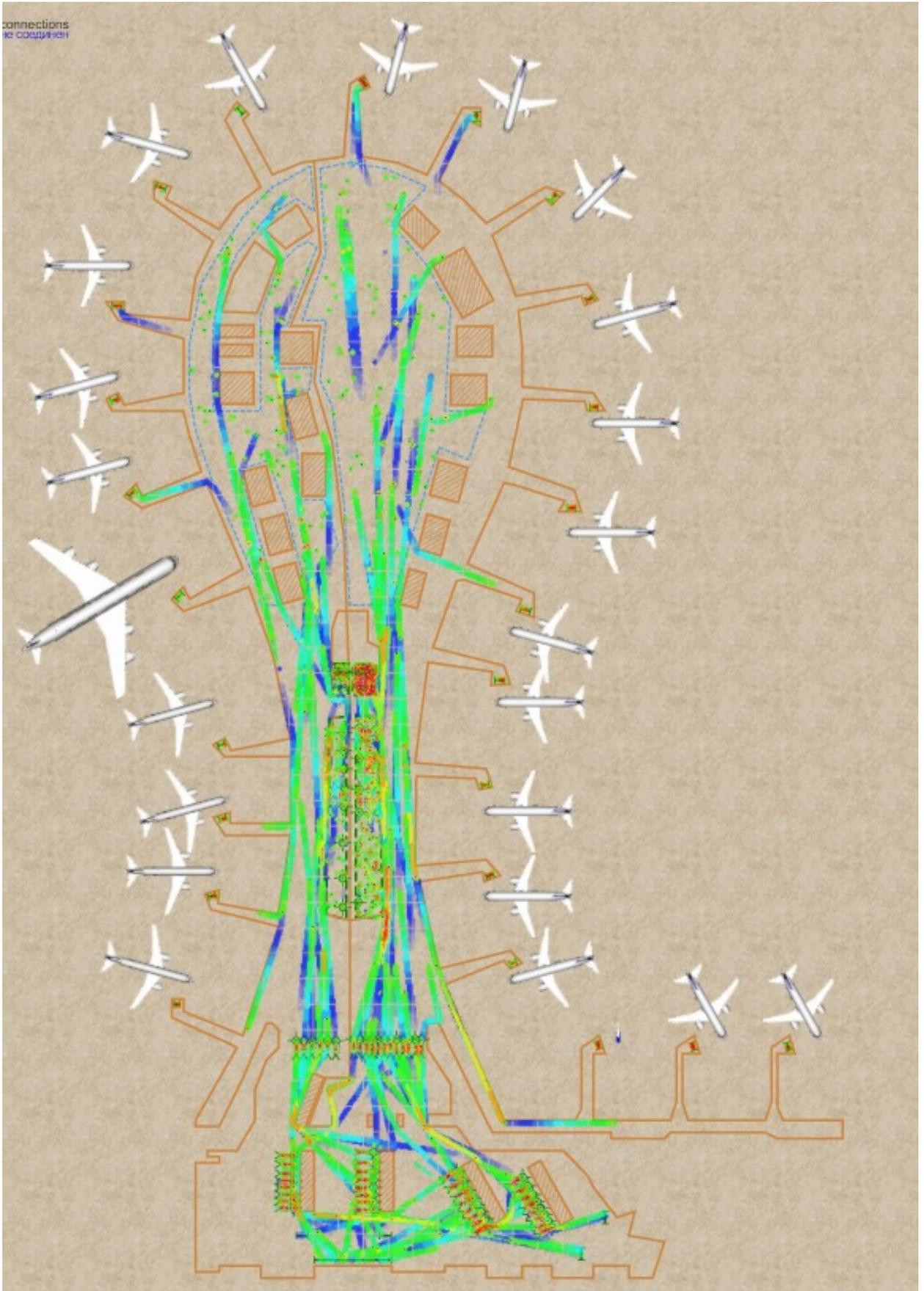


Рисунок 11. Карта плотности движения пешеходов.



Рисунок 12. Количество вылетевших пассажиров.

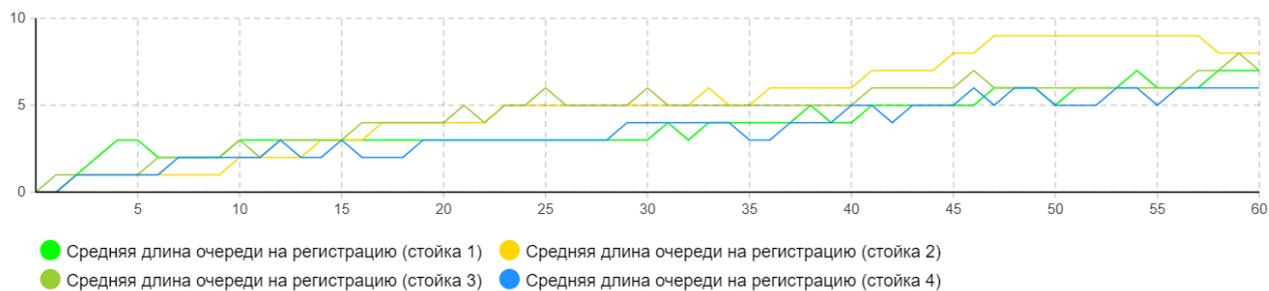


Рисунок 13. Динамика средней длины очереди на регистрацию.



Рисунок 14. Динамик средней длины очереди на досмотр.



Рисунок 15. Время пребывания в терминале.

## Распределение работы

	Обязанности
Пахарева Кира	Поиск темы, определение целей и задач, описание содержательной постановки задачи, построение модели аэропорта, участие в написании отчета и создании презентации, анимация модели международных рейсов.
Юркин Павел	Изучение источников по теме, разработка модели, участие в написании отчета и создании презентации, поиск литературы, определение входных и выходных переменных, параметров и законов распределения, анимация модели внутренних рейсов.

## Источники

1. Сайт аэропорта «Внуково» [Электронный ресурс]. / – Режим доступа: <http://www.vnukovo.ru/>
2. Сайт федерального агентства воздушного транспорта [Электронный ресурс]. / – Режим доступа: <https://favt.gov.ru/>
3. Обучающие видео и вебинары от AnyLogic [Электронный ресурс]. / – Режим доступа: <https://www.anylogic.ru/resources/educational-videos/>
4. Техническая документация AnyLogic в электронном формате [Электронный ресурс]. / – Режим доступа: <https://help.anylogic.ru/index.jsp>
5. И. Григорьев. «AnyLogic за три дня. Практическое пособие по имитационному моделированию». Издательство: Интернет-издание. 2016. 202 с.
6. Каталевский, Д.Ю. Основы имитационного моделирования и системного анализа в управлении: учебное пособие; 2-е изд., перераб. и доп. / Д.Ю. Каталевский. — М.: Издательский дом «Дело» РАНХиГС, 2015. — 496 с., ил
7. Киселева М. В. Учебно-методическое пособие «Имитационное моделирование систем в среде AnyLogic». Екатеринбург: УГТУ - УПИ, 2009. 88 с.